単発自由噴霧火炎の熱発生率の予測に関する研究*

(第2報, モデルの改良)

張 英 俊**, 神 本 武 征**
小 林 治 樹**, 松 岡 信**

Prediction of the Rate of Heat Release of a Transient Free Spray Flame

(2nd Report, Improvement of the Model)

by Young June CHANG, Takeyuki KAMIMOTO,
Haruki KOBAYASHI, and Shin MATSUOKA

A simulation model predicting the heat release rate of a transient free spray flame which was proposed in the previous paper was improved: (1) the break up and evaporation delay was introduced; (2) the definition of flame region was changed; and (3) the turbulent energy dissipation model was assumed for the combustion after the end of fuel injection. And it was confirmed that the improved model could successfully simulate the rate of heat release of a diesel flame in the quiescent chamber of a rapid compression machine.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Rapid Compression Machine, Transient Spray, Combustion, Simulation

1. ま え が き

前報⁽¹⁾において、急速圧縮装置⁽²⁾における単発自由噴霧火炎の空気導入率に関する実験結果と高速度写真による火炎の観察結果に基づき自由空間中の単発噴霧火炎の熱発生率予測モデルを提案した。このモデルによる予測値を実測値と比較したところ、拡散燃焼期間での熱発生率予測は良好であるが、初期燃焼期間における予測値が小さすぎる、後燃え期における熱発生率の予測値が早く低下しすぎるなど、実測値と一致しない点があった。本報では主として後燃え期における予測値の改善をねらった。改良点は以下の3点である。

(1) 後燃え期において、混合は乱流エネルギー消散率に支配されるものとした。

(2) 分裂・蒸発遅れを導入した。

(3) 火炎領域の定義を変更した。

以下、モデルの改良点と改良後のモデルについてその妥当性を検討する。

2. 熱発生率の予測モデル

基本仮定については本報で分裂・蒸発遅れを考慮したことを除いて全く前報と同様である。前報では燃料は噴射された瞬間に蒸発を完了するものと仮定したがこの仮定は非現実的であり、実際には噴射された燃料は分裂・蒸発した後に燃えるので、これに対応する遅れを考慮する必要がある。本報では分裂・蒸発遅れを既報⁽³⁾を参考にして0.4 msとした。

本モデルは空気導入モデル、混合モデル、燃焼モデルの三つのモデルから構成される。

2・1 空気導入モデル 空気導入率は準定常項と非定常項の和として与えた。準定常噴霧火炎の空気導入率は定常噴霧の空気導入率を基礎に、燃焼に伴う温度上昇により空気導入が妨げられる効果を考慮して与えた。噴射終了後の空気導入は火炎後端の移動を考慮して求めた。非定常項は初期燃焼時に起こる火炎の急激な膨張に起因する非定常的な空気導入率の増加を表すものであり、これは体積膨張速度に比例すると仮定して計算した。

2・2 混合モデル

2・2・1 燃料濃度の確率密度関数 蒸発率は噴射率を蒸発遅れだけシフトしたものと考え、蒸発した燃

* 昭和59年11月21日 第928回講演会において講演、原稿受付 昭和59年5月28日。

** 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

料と空気との混合を考える。ある時刻における火炎内の燃料質量分率 f は巨視的にみると火炎周辺ほど f が小さい分布になっている。 f に対する混合気質量の確率密度関数 $P(f)$ および燃料質量の確率密度関数 $P_f(f)$ は、それぞれ図1中に示す式で表されるものと仮定した。 A は未混合空気割合、 $\bar{f}$ は平均燃料質量分率、 $\delta(0)$ はデルタ関数、 b は確率密度関数の形状係数である。

2.2.2 混合速度 いま図1のように過濃側可燃限界 f_r を設定し、 $f=0 \sim f_r$ の範囲を燃焼領域とすると燃焼領域内の燃料質量 m_{fb} は燃料と空気との混合が進むにつれて増加してゆく。したがって火炎内最高燃料質量分率 f_{mx} を仮定し、 m_{fb} が計算できれば $p_r(f)$ の形が決まる。前報では噴口近くに未燃の領域を考えることによって分裂・蒸発遅れを考慮したが、本報では分裂・蒸発遅れを仮定し、噴射期間中および噴射終了後の火炎をそれぞれ図2の斜線部分のように定義した。この領域内に未燃・既燃の燃料質量分率 f の混合気が図1のように分布していると考え、図2中の s は火炎の先端到達距離であり、非蒸発噴霧の高速写真に基づいて求める。

m_{fb} の増加速度 $\dot{m}_{fb}$ は次のようにモデル化する。

(1) 噴射期間中 前報と全く同様に混合速度 $\dot{m}_{fb}$ は噴霧全体のマクロな濃度こう配に支配されると考える。

(2) 噴射終了後 噴射終了後はマクロな濃度分布が急激に一様になってゆくとためミクロな混合を考慮に入れる必要がある。噴射終了後の燃料混合速度 $\dot{m}_{fb}$ 、

すなわち火炎内の未燃燃料の減少率は次のように表せる。

$$-\frac{dm_{fu}}{dt^*} = C_1 \frac{m_{fu}}{\tau} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで m_{fu} は未燃燃料の質量、 C_1 は比例係数、 $t^* = t - t_{inj}$ で、 t は噴射開始からの時間、 t_{inj} は噴射期間である。式(1)を積分して、 $m_{fb} = m_{fue} - m_{fu}$ を用いて整理すると次のようになる。

$$\dot{m}_{fb} = \frac{d}{dt^*} \{ m_{fue} [1 - \exp(-ct^*/\tau)] \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで m_{fue} は噴射終了時の未燃燃料の質量である。混合特性時間 τ は次のように表すことができる⁽⁴⁾。

$$\tau = (D_0^2/\varepsilon)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで D_0 は等価ノズル直径 $[= D_n(\rho_f/\rho_a)^{1/2}]$ である。ただし ρ_f, ρ_a はそれぞれ燃料と空気の密度、 D_n は噴口径である。乱流エネルギー消散率 ε は燃料に与えられる単位質量当たりのパワーに比例する⁽⁵⁾として次のように書く。

$$\varepsilon = C_2(1/t_{inj})^3 (V_f/D_0^2)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで V_f は噴射された燃料の体積、 C_2 は比例係数

表1 噴射条件

Ser.	Nozzle dia. mm	Injection duration ms	Fuel amount mg	Ave. rate of inj. g/s	Ave. inj. pressure MPa
A	0.2	3.05	15.1	4.95	22.4
B	0.14	3.05	7.5	2.46	22.8
C	0.25	3.0	22.8	7.60	21.7
D	0.2	3.0	17.4	5.80	31.2
E	0.2	2.5	11.4	4.56	19.3
F	0.2	2.1	9.0	4.29	19.3
G	0.2	2.7	15.0	5.56	29.9
H	0.25	2.15	14.3	6.65	19.5

図1 確率密度関数 $P(f)$ 、 $P_f(f)$ の概念図
($b=1, f_{mx}=1, \bar{f}=1/6$ の場合)

図2 火炎の定義と火炎中心軸に沿う f の分布

である。式(2)中の比例係数 C は $C = C_1/C_2^3$ の意味をもつが、計算においては噴射期間中と噴射終了後で熱発生率曲線が連続になるように定めた。

噴射終了後において燃料濃度が最大になる位置 s_{mx} は実験結果を参考にして次式で表されるものとする。

$$s_{mx} = C_{mx} K_p \sqrt{t^*} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで C_{mx} と K_p は比例係数である。噴射終了後においても噴霧軸上の燃料質量分率が図2のようであるとして最大燃料質量分率 f_{mx} を定める。

以上より $\dot{m}_{fb}$ が計算されれば、これと f_{mx} とから $P_f(f)$ の時間的变化が求められる。

2.3 燃焼モデル 前報と同様に燃焼は混合律速で行われると仮定して、熱発生率を求める。

3. 実験条件および計算条件

3.1 実験条件 モデルの妥当性を検討するため、表1のような八通りの噴射条件について大形急速圧縮装置を用いて熱発生率を実測した。表2は急速圧縮装置内に実現した雰囲気条件を示す。

3.2 計算条件 噴射率は噴射期間中、表1の平均噴射率に、また雰囲気は表2に示す値に一定に保た

表2 雰囲気条件

	Inj. cond.	Pressure MPa	Temp. K	Density kg/m ³	Ini. temp. K	Gas	
I	A-H	3.05±0.05	737±10	14.4±0.1	360±2	Air	Flame
II	A	3.21±0.03	692±3	16.2±0.4	320±8	Air	Flame
III	A	3.27±0.01	668±7	17.0±0.2	305±3	Air	Flame
IV	A-H	1.49	290±1	17.3±0.1	290±1	N ₂	Spray

表3 計算に用いた各係数の値

Inj. cond.	(Kp) _s	K _v	(C _g) _s	Sp _{mm}
A, E, F	1.80	0.115	1.99	40
B	1.45	0.070	1.21	32
C, H	1.85	0.150	2.60	41
D, G	1.95	0.155	2.68	43

$C_m = 0.0084$, $C_u = 1.0$, $C_{th} = 0.7$, $f_r = 0.17$,
 $C_t = 0.8$, $C_{mx} = 1.0$ for all inj. cond.

れるとする。噴霧の空気導入係数 C_e 、比例係数 K_p および図2中の s_p は噴霧の高速度影写真および背景散乱光写真より燃焼時の雰囲気密度を考慮して表3のように決めた。ここで添字 s は噴霧に対する値であることを示す。空気導入に関する係数すなわち温度上昇による効果を表す係数 C_{th} と非定常効果係数 C_u は前報と同じ値を用いた。燃料濃度が最大になる位置は噴霧先端と同じ動きをするとして式(5)の C_{mx} を1.0とする。過濃側可燃限界 f_r および混合速度係数 C_m 、噴霧後端位置係数 C_t は条件A、雰囲気Iの火炎に対し、噴射終了時において熱発生率の実測値と計算値がほぼ一致するように決め、この値をすべての条件に対して用いた。

図3 熱発生率の予測値と実測値との比較

図4 熱発生率の予測値と実測値との比較 (噴射期間一定で噴射率を変えた場合)

図5 熱発生率の予測値と実測値との比較 (噴射率一定で噴射期間を変えた場合)

4. 予測値と実測値との比較

図3に熱発生量の予測値と実測値との比較の一例を示す。各条件において両者はよく一致している。図4に噴射率を変えた場合の熱発生率の予測値と実測値との比較を示す。拡散燃焼のピークの大きさおよび熱発生期間に関して両者は良い一致を示している。また拡散燃焼のピークの発生時期も良く一致している。これは仮定した分裂・蒸発遅れの妥当性を示している。図5に噴射率一定で噴射期間を変えた場合の熱発生率の比較を示す。噴射期間を短くしても熱発生期間が短くならないという実際の現象が予測結果にも現れている。着火遅れを変えた場合と噴射量一定の場合も予測値と実測値は良い一致を示した。しかし予測値は全般的に二つのピークの谷間部分が実測値より浅く予測されており、これは既燃ガスによる混合抑制の効果を考慮していないためと考えられる。

5. ま と め

自由空間中の単発噴霧火炎を対象とした熱発生率予測モデルの改良を行った結果以下の結論を得た。

(1) 後燃え期において、乱流エネルギー消散率に支配される混合モデルを導入することによって、噴射終了後の熱発生率を適切に予測できた。

(2) 分裂・蒸発遅れの導入により拡散燃焼のピーク発生時期が実測値と良く一致した。

文 献

- (1) 小林・ほか2名, 内燃機関シンポジウム講演論文集, (昭57-7), 79.
- (2) 小林・ほか2名, 機論, 48-425, B (昭57), 168.
- (3) Kamimoto, T. and Matsuoka, S., *SAE Paper*, 770413 (1977).
- (4) Dent, J. C. and Mehta, P. S., *SAE Paper*, 811235 (1981).
- (5) Brodsky, R., *Turbulence in Mixing Operations*, (1975), 90, Academic Press.